

ВЛИЯНИЕ СЛАБОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ФАЗОВЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И МИНЕРАЛАХ

В.В. Соболев, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Украина

Показано, что при воздействии на равновесную систему внешним электрическим полем, положение равновесия и процессы в системе сместятся в направлении ослабления эффекта воздействующего поля. В этом случае, по крайней мере, хотя бы одна новая минеральная фаза по сравнению с любой из исходных фаз будет характеризоваться большим значением диэлектрической проницаемости. В сочетании с воздействиями других физических полей роль слабого электрического поля проявляется в способности инициировать химические реакции, что проявляется в скачкообразном увеличении проводимости, стимулировании превращения органической массы углей в газы, в снижении энергетического барьера образования зародыша новой фазы и др.

Физико-химические условия формирования в земной коре рудных тел, твердых, жидких и газообразных углеводородов, драгоценных и редких металлов, углеродных минералов и месторождений различных полезных ископаемых не ограничиваются воздействием давления и температуры в присутствии флюида. Кроме этих двух фундаментальных факторов непосредственное влияние на зарождение и рост новых минеральных фаз, на структурные и фазовые превращения могут оказывать так называемые «вторичные» параметры – слабые электрические и магнитные поля, энергия которых на много порядков меньше энергии теплового движения молекул. Кажется очевидным, что ничтожной энергией этих полей в сравнении с тепловой энергией можно пренебречь. Однако интерпретировать некоторые наблюдаемые эффекты с точки зрения действия только первых двух параметров иногда оказывается невозможно.

Свидетельством игнорирования электрических и магнитных полей в оценке параметров минералообразования является известная схема фаций метаморфизма – Р,Т-диаграмма, на которой показаны поля устойчивости как отдельных минералов так и минеральных ассоциаций. Эта диаграмма построена по данным физических экспериментов и она не учитывает влияние на исследуемые материалы других полей, кроме давления и температуры.

Механизмы, формирующие ту или иную степень устойчивости горных пород или минеральных систем, являются следствием различных физико-химических процессов, протекающих в массиве пород. Закономерным результатом таких процессов являются изменения свойств и характеристик пород при комплексном характере механических и других физических воздействий.

Очевидным недостатком знаний в области геомеханики (и в науках о Земле) является весьма незначительный объем информации о роли слабых электрических и магнитных полей в процессах образования минералов, углей, о закономерностях формирования рудных тел, состояний неустойчивого равновесия в породах (выбросоопасных состояний) и очагов землетрясений. Исследования причин и механизмов формирования состояния неустойчивого равновесия или метастабильности различной степени, возникновения катастрофических и других негативных явлений в геотехнических системах являются актуальными.

До сих пор исследования, проводимые в области физики горных пород, мало уделяли внимания деструктивным явлениям в породах, стимулированным действиями слабых физических полей. Несмотря на то, что эта область остается все еще мало изученной, есть серьезные основания считать, что именно она представляет собой часть того недостающего объема знаний в области геомеханики, который в целом будет способствовать эффективному развитию и совершенствованию методов контроля и диагностики геомеханического состояния подземных геотехнических систем.

Цель работы – показать роль слабых электрических полей в изменении физико-

химических характеристик горных пород и предложить новую систему взглядов на явления в горных породах, протекающие под действием одновременно нескольких физических параметров.

Внешнее воздействие, выводящее термодинамическую систему из состояния устойчивого равновесия, вызывает в системе процессы, направленные на уменьшение влияния этого внешнего возмущения (принцип смещения равновесия – принцип Ле-Шателье–Брауна). Изолированная система (как физическая модель) может неограниченное время находиться в состоянии устойчивого равновесия при постоянных значениях действующих внешних параметров. Из закона возрастания энтропии следует, что рост энтропии такой системы происходит до тех пор, пока в ней не затухают все необратимые процессы. В этом случае энтропия достигает максимального значения, т.е. система достигает термодинамической устойчивости.

Первичной причиной, нарушающей равновесное состояние горного массива, являются механические процессы, протекающие в земной коре. Деформация является первой ответной реакцией пород на такие воздействия, при этом структура минералов, слагающих горные породы, претерпевает внутренние изменения при развитии деформаций, часть упругой энергии переходит в электрическую. Характер внутренних изменений минералов может быть обусловлен увеличением или уменьшением межатомных расстояний, возникновением точечных и линейных дефектов, изменением типа кристаллической решетки, образованием новых активных поверхностей, превращением кристаллов в аморфное состояние и др. Таким образом, структурные изменения оказывают существенное влияние на механические и физико-химические свойства минералов и горных пород.

Вероятно, что наиболее «продуктивными» периодами в развитии земной коры, с точки зрения минералообразования и формирования месторождений полезных ископаемых, являются стрессы, вызванные тектонической активизацией, переходами геосистем из состояния устойчивого равновесия к состоянию с минимальной энтропией, сопровождающимися фазовыми и структурными превращениями, различными химическими реакциями, включающими образование новых фаз, изменением текстурных особенностей и другими процессами.

Начало физико-химических превращений в породах и минералах, как правило, происходит под действием давления (сложного деформирования, механоактивационных процессов, запасаения кристаллических компонентов дополнительной энергией и др.), температуры (локальный нагрев микро- и нанокомпонентов, нагрев поверхностей, выделение энергии за счет разрыва связей и др.). Возникновение электрических токов в горных породах и проявление электрических эффектов обусловлено связанными непосредственно между собой различными физико-химическими процессами, протекающими внутри ядра Земли, в земной коре и в атмосфере. Например, глобальные токи в ионосфере связаны с излучением солнечной плазмы; резкие короткопериодические колебания в вариациях магнитных показателей возбуждают образование электрических токов внутри Земли. В периоды тектонической активности и вулканической деятельности в горных породах за счет механохимических возникают электрические процессы. На определенном этапе протекающих физико-механических процессов электрическое поле может играть ведущую роль при всех прочих постоянных или мало изменяющихся параметрах.

Экспериментально установлено [1], что в случае предварительной дестабилизации микроструктуры материалов, т.е. микроструктуры, находящейся вдали от устойчивого равновесия, процессы различных физико-химических превращений в минералах, горных породах, металлических сплавах и других системах протекают с большей интенсивностью, потребляя для превращений существенно меньшую энергию. Предварительно дестабилизированная микроструктура кристаллических материалов характеризуется высокой внутренней дополнительной запасенной энергией, которая высвобождается в последующих процессах, инициированных другими обработками. В целом по результатам фазовых и структурных превращений энергетические затраты превосходят суммарное значение энергий

каждой из обработок.

Для подтверждения эффективности комплексных обработок на нескольких примерах покажем основные результаты воздействия электрического поля на различные материалы.

Углеродные и содержащие углерод материалы.

При электростимуляции неупорядоченных и неравновесных систем (напыленных пленок углерода, стекловидного углерода, окислов, стекла, и т. д.) обнаружен эффект обратимого запоминаемого переключения [2]. Этот эффект состоит в том, что при некотором значении порогового напряжения (2...10 В) изменение электрического сопротивления этих систем характеризуется скачкообразным падением на два- три порядка величин (например, с 10^6 до 10^3 Ом). Оба эти состояния – высоко- и низкоомное являются метастабильными и сохраняются в течение нескольких суток. По предположению авторов работы этот эффект обусловлен неустойчивостью метастабильного электронного состояния, т.е. электронная подсистема вещества может находиться в нескольких метастабильных состояниях (энергетических уровнях). Метастабильное электронное состояние характеризуется неодинаковой степенью ионности атомов углерода, альтернированием межатомных связей, изменением характера локализации в распределении электронов вокруг атомных остовов.

Карбонаты. Особенности внешнего проявления эффекта аналогичны впервые полученным результатам обработки электротермическими полями ионных кристаллов – сидерита (рис. 1) и его производных [3], поскольку и в первом [2], и во втором случае [3] надежно фиксируется скачкообразное уменьшение сопротивления.

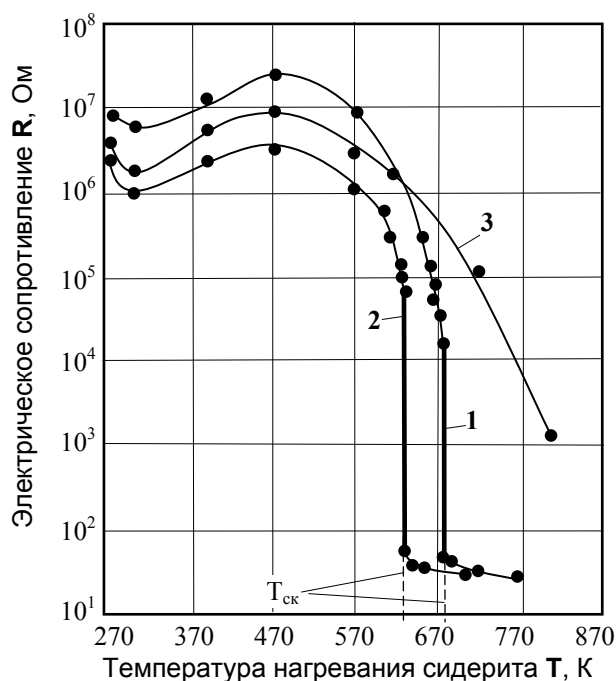


Рис. 1. Изменение температуры скачка $T_{ск}$ сопротивления сидерита от величины напряженности электрического поля (В/см): 1 – 80; 2 – 290; 3 – изменение сопротивления только при нагревании

Принципиальное отличие полученных результатов заключается в том, что при электротермической стимуляции сидерита (напряжение в диапазоне 10...300 В; токи от нескольких мкА до максимального стабилизированного значения 0,3 А) образуется новая устойчивая углеродная фаза с электронным типом проводимости – графит. Эту фазу удалось зафиксировать с помощью рамановской спектроскопии. При простом нагревании сидерита электропроводные фазы не образуются.

Скачки увеличения электропроводности соответствует температурам 625 и 680 К. При воздействии только температуры этот эффект не наблюдается. Дифференциальный

термический анализ сидерита (рис. 2) свидетельствует о том, что максимальное поглощение тепла при нагревании данного образца соответствует температуре 828 К, т.е. на 150...200 К выше, чем при условии дополнительного действия поля.

Важным результатом исследований является синтез графита в межзерновых границах при температурах 570...685 К. При указанных температурах происходит наиболее бурная химическая реакция разложения. Механизм образования зародыша новой электропроводной фазы (нанокристаллов графита) непосредственно связан с флуктуациями энергии и вещества. Спонтанное зародышеобразование обусловлено пересыщением атомарного углерода в пространстве межзерновых границ. Более подробно этот механизм описан в [4].

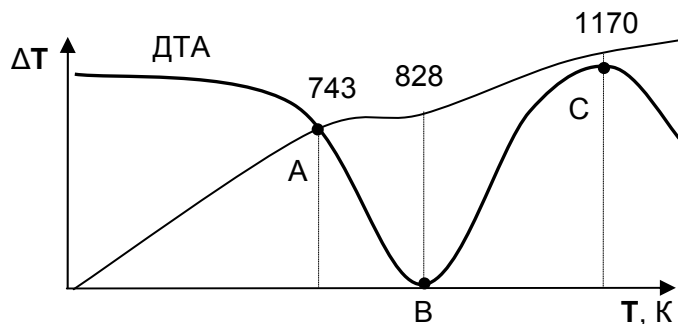


Рис. 2. Кривая дифференциального термического анализа сидерита

Для условий, при которых получают синтетический графит, характерна высокотемпературная обработка. Например, нагреванием смеси кокса и пека до 3080 К получают ачесоновский графит; пирографит получают пиролизом из газообразных углеводородов при температуре 1670...1770 К в вакууме с последующим нагреванием образовавшегося пироуглерода до температуры 2780...3270 К при давлении 50 МПа.

Еще один результат, на который следует обратить внимание, связан непосредственно с образованием «токовой нити» (шнура) – фазы с электронным типом проводимости. Поскольку все карбонаты представляют собой ионные кристаллы, то формирование токопроводящих шнуров, состоящих главным образом из нанокристаллов графита, частично магнетита, является естественным направлением процесса – электрический ток формирует для себя путь с наименьшим сопротивлением, уменьшая, таким образом, влияние внешнего возмущения (действия электрического поля).

При дополнительном воздействии электрического поля на химическую реакцию конечными продуктами будет, по крайней мере, одна фаза, диэлектрическая проницаемость которой будет выше, чем любой исходной. Аналогичные результаты получены при обработке электротермическими полями яшмы (рис. 3) [5], кальцита [6], смеси порошков кальцита, сидерита и кремния, сидерита и кремния [7].

Каменные угли. Интерес к исследованиям влияния прохождения слабых электрических токов на фазовые переходы в углях вызван тем, что в природе тектоническая активизация сопровождается не только сложным деформированием горных пород, но и увеличением значений напряженностей электрических и магнитных полей. Предполагается, что переходы уголь→газ как при механических, так и электрофизических воздействиях, по сути, являются идентичными и могут быть описаны механизмом, в основе которого лежат тепловые эффекты.

Внимание к исследованиям углей обусловлено главным образом актуальностью фундаментальных исследований свойств углей в рамках проблемы его происхождения и природы газодинамических явлений, изменения свойств и повышения эффективности переработки углей в энергетические и другие полезные компоненты.

То или иное явление, стабильно наблюдаемое на практике или в эксперименте с углем, – как правило, статистически достоверно, но чаще всего страдает неубедительной физической интерпретацией. На наш взгляд, такое состояние можно объяснить сложной гетерогенной

смесью различных высокомолекулярных соединений; специфической структурой каменного угля, все компоненты которого относятся к наноразмерным объектам; использованием методологии исследований структуры как микроразмерной системы; особенностями свойств, как атомарного углерода, так и углеродных фаз (графены, углеродные и углеводородные цепочки), которые не принимаются во внимание так же, как и металлические кластеры с редкими каталитическими, магнитными и оптическими свойствами.

Анализ результатов работ в области исследования физических свойств графена служит основанием для предположения о его принципиальном влиянии на электрофизические и другие свойства угля. Если графен находится на поверхности фазы, в состав которой входит кислород, то он принимает свойство полупроводника, если же в состав фазы входит водород, то графен проявляет металлические свойства. Известен также эффект роста электропроводности графенов от степени дефектности. Кроме этого, на процесс углефикации оказывало воздействие несколько физических факторов – в зависимости от того какой из факторов был ведущим в химическом процессе формировались те или иные свойства угля даже в пределах одного пласта.

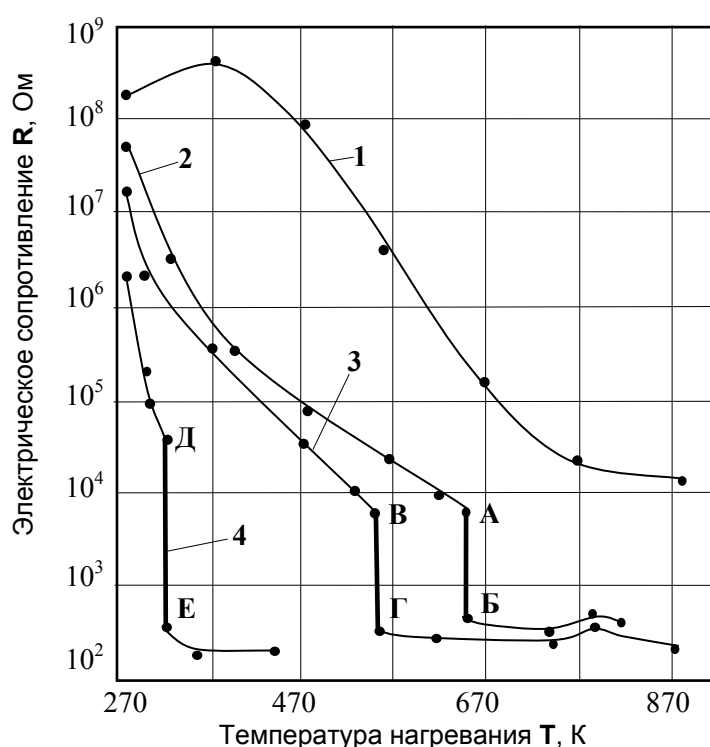


Рис. 3. Изменение электрического сопротивления яшмы от температуры при постоянном значении напряженности внешнего электрического поля ($E_3=300$ В/см) [5]: 1 – простой нагрев; 2, 3, 4 – соответственно первая, вторая и третья термоэлектрическая обработка; А-Б, В-Г и Д-Е – участки кривых, соответствующие скачку сопротивления

Первые результаты электростимулированной обработки каменных углей при $T \leq 340$ К, $U = 200$ В, частоте электрического поля $f \geq 800$ Гц приведены в работе [8]. В своих экспериментах автор показал выход следующих газов из угля марки Ж: легкие углеводороды (ЛУВ), высокомолекулярные углеводороды (ВМУВ), газы – O_2 , H_2O , Ar (малоинтенсивные пики ЛУВ и ВМУВ. Содержание Ar – наибольшее).

Результаты дифференциального термического анализа и масс-спектроскопических исследований угольных газов, полученные при простом нагревании измельченных углей марок КЖ и антрацита [9; 10], приведены в табл. 1.

Интенсивный выход электростимулированного CH_4 и CO из угля КЖ зафиксирован при температуре 340 К (табл. 2), т.е.соответственно на 200 К и 250 К ниже чем в случае простого

нагреваия угля (табл. 1).

В табл. 2 опыты 2 и 3 относятся к исследованиям электростимулированных обработок углей, проводимым в ГВУЗ «Национальный горный университет» [12; 13].

Таблица 1

Условия и характер выхода газов при нагревании угля

Молекулы, соединения	Температура выхода газов из углей	
	Уголь «КЖ» [9]	Антрацит [10]
N ₂ , O ₂ ; CO	десорбция газов из поверхностных слоев образца угля при 300 К;	–
H ₂ O; OH ⁺	максимальный выход в диапазоне 320...390 К; торой максимум 700 К	максимальный выход при 480 К и 710 К;
CO ₂ ; CO	интенсивный выход при 600 К; максимальный – при 650 К	интенсивный выход в диапазоне 450–680 К; максимальный при 720...740 К
CH ₄	низкий выход (поверхностное испарение) при 300...600 К; интенсивный выход начинается при 650 К; максимальный при 720 К	низкий выход (поверхностное испарение) в диапазоне 300...700 К; начало интенсивного выхода при 720 К; максимальный – при 900 К
Ароматические и алифатические соединения	740 К и более	900 К и более

Таблица 2

Подвижные компоненты, выделяющиеся из углей марки КЖ при физических воздействиях

№	Вид и параметры обработки угля	Продукты деструкции	Примечание
1	Механоактивация (в шаровой мельнице), Т до 340 К	Радикалы – COOH, CON, CH ₂ , CH ₃ , CH _{ар} и др. Газы – CO ₂ , CO, H ₂ , CH ₄ , O ₂ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ и др.	Выделение подвижных радикалов и устойчивых молекул газа [11]
2	Электроактивация цельных образцов, уголь Ж, КЖ Т до 340 К, E = 1...300 В/см, f = 50 Гц	Ионы – CO, N ₂ , CH ₄ , O ₂ , H ₂ O	По составу радикалов и газов результаты аналогичны [6; 11]
3	Измельчение и последующая электроактивация угля Ж, КЖ Т до 315±5 К, E = 1...300 В/см, f = 50 Гц	Радикалы – COOH, CON, H, CH, CH ₃ Ионы – CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , Ar, O ₂ , CO, H ₂ O, C ₂ H ₆ , и др.	Состав радикалов и газа аналогичен опыту п. 1; количество метана увеличилось почти вдвое

Переход твердой фазы измельченного угля в газ, стимулированный воздействием слабых электрических полей и нагреванием до 300...310 К, приводит к увеличению концентрации подвижных компонентов, уменьшению среднего размера зерна кристаллической компоненты и увеличению степени «аморфности» каменных углей в целом [13].

В углях с низкой степенью углефикации электростимулированная обработка приводит к деструкции наноструктуры так же интенсивно как, например, в результате

механохимических или радиационно-химических превращений.

Образование газа и радикалов в углях при пропускании слабого электрического тока является низкотемпературным процессом. Если не использовать электрическое поле, то аналогичные результаты могут быть достигнуты при нагревании угля до температур, превышающих 460 К.

Поскольку действие электрического поля не только стимулирует образование газа, аналогично термической или механохимической активации, но, как показывают результаты исследования, снижают температуру интенсивного выделения газов. Полученные результаты дают основание предполагать, что формирование выбросоопасных состояний в углях принципиально может осуществляться в условиях механохимической активации, прохождения слабого электрического тока и локальных повышений температуры.

В результате пропускания слабого постоянного электрического тока образцы различных углей приобретают разность потенциалов $U_{В.П.}$, которая обнаруживается после выключения поляризующего электрического тока.

По известной компенсационной методике определяли вызванный потенциал $U_{В.П.}$, величина которого (электретная разность потенциалов) спадает во времени по закону

$$U_{В.П.} = U_{В.П.0} \cdot \exp(-\lambda \cdot \tau),$$

где $U_{В.П.0}$ – разность вызванных потенциалов в момент времени $\tau=0$; λ – постоянная распада поля вызванной поляризации.

Способность породы, создавать $U_{В.П.}$ характеризуется вызванной электрохимической активностью

$$A_B = U_{В.П.} / U_{ПР.},$$

где $U_{ПР.}$ – разность потенциалов, приложенная к образцу угля. Так вызванная электрохимическая активность (A_B) для выброшенного угля Ж (ш. им. А.Ф.Засядько) составляет $8,8 \cdot 10^{-6}$, из невыбросоопасной зоны – 10^{-2} , т.е. разница более чем три порядка. Вычисленные значения A_B аналогичны приведенным в работе [14], авторы которой рассматривают полученный результат как один из возможных критериев оценки выбросоопасного состояния.

Алмазы. С 1980 г. в печати стали появляться публикации о синтезе алмаза в «экстремальных условиях», особенность которых заключалась в предварительном нагреве чугуна до 1300 К или смеси медного порошка с графитом (до 1100 К) с последующим сжатием ударной волной давлением около 4 ГПа [15; 16]. Совершенно очевидно, что в поле диаграммы алмаз–графит процесс синтеза осуществлялся в области термодинамической метастабильности алмаза.

Обратим внимание на указанные значения температуры и давления. Без предварительного нагрева давление ударной волны во всех известных технологиях составляет не меньше 25 ГПа (чаще всего около 40 ГПа), т.е. за счет дополнительной тепловой энергии (начальной температуры нагрева) давление ударной волны оказалось достаточным для синтеза алмазного зародыша, несмотря на то, что термодинамика запрещает образование алмазного зародыша при таких давлениях в сочетании с любыми температурами. Способ нагревания образцов чугуна или смеси спрессованных порошков $Cu+C$ заключался в пропускании через образцы электрического тока величиной несколько сотен ампер. В результате таких воздействий на образцы чугуна синтезированы монокристаллы алмаза размером до 100 мкм; в смеси порошков $Cu+C$ максимальный размер достигал 800 мкм.

В технологии промышленного производства (область высоких статических давлений и температур) алмазный микрокристаллический порошок представляет собой смесь зерен различного размера, при этом гранулометрический состав характеризуется двумя максимумами, что считается недостатком, рис. 4. При электромагнитном воздействии на технологический сплав никель-марганец, содержащий графит и алмаз, установлен новый

характер распределения зернистостей синтезированных частиц алмаза (рис. 4), который практически не отличался от ранее полученного результата [1; 17] – выделяется один максимум на кривой распределения (за счет дробления более крупных).

Воздействие электромагнитных полей сильно изменяет топологию кривой распределения зерен алмазного порошка по фракциям. Происходит значительный рост содержания основной фракции. Масса частиц зернистостью 100/80 повышается в 1,23...1,45 раза в зависимости от режима электромагнитной обработки по сравнению с массой данной фракции, выделенном из продуктов синтеза, полученных по стандартному режиму. Существенно увеличивается количество мелких монофракций. Наряду с этим, наблюдается резкое уменьшение содержания друз, сростков и других крупных фракций, включающих в свой состав поликристаллические агрегаты. При термическом активировании до температуры 920...970 К магнитная и электромагнитная обработка обеспечивают почти полное исчезновение второго пика на кривой распределения. В то же время необходимо отметить, что обычной термообработки при 920...970 К недостаточно для получения указанного эффекта.

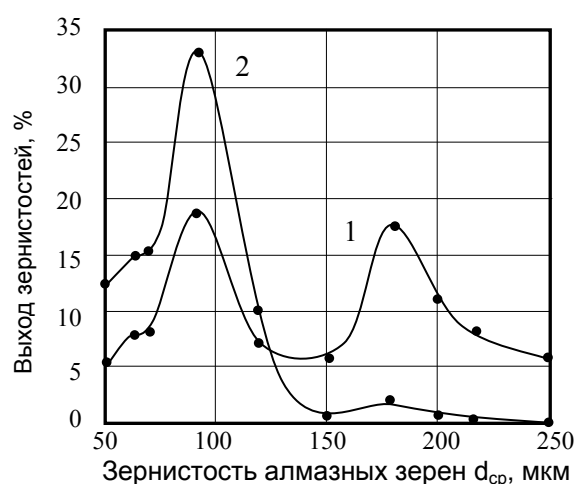


Рис. 4. Характер распределения промышленных кристаллов алмаза:

1 – после стандартного синтеза; 2 – после дополнительной электромагнитной обработки

Обработка технологического сплава проводилась при температуре не более 700 К. Падение напряжения на концах обрабатываемого сплава составляло 200...300 мВ. Расчетные значения величины напряженности электрического поля на границе раздела алмаз-сплав составляли $(5...30) \cdot 10^5$ В/см. Запись показаний амперметра засвидетельствовала монотонное увеличение силы тока, проходящего через сплав, более чем на два порядка, достигающего некоторого насыщения. Падение сопротивления можно объяснить распадом твердых растворов углерода в металлическом сплаве и уменьшением концентрации структурных дефектов решетки. Время, в течение которого изменялись показания величины постоянного тока, было различным, но не выходило за пределы 40...60 мин.

Характерной особенностью воздействия электромагнитного поля в сравнении со стандартным синтезом промышленных алмазов, является существенное увеличение выхода алмазов (8...15%), резкое уменьшение процентного содержания друз в смеси выделенных кристаллов (до 0,21%) и, что особенно важно, на 17...38% увеличивается прочность кристаллов на одноосное сжатие. Стимулирующее действие тока проявляется в направленном переносе атомов углерода к поверхности растущего алмаза.

Заключение

В работе на нескольких примерах мы рассмотрели эффект действия электрических полей слабой напряженности на некоторые минералы, минеральные системы и горные породы. Благодаря полученным результатам, слабые поля как источники пренебрежимо малых энергий должны не только приниматься во внимание, но и должна формироваться

принципиально новая физическая концепция их роли в природных процессах минералообразования.

Действие электрического поля слабой напряженности на какую-либо минеральную систему, ее реакционная способность и чувствительность к воздействиям других физических полей заключается не столько в величине напряженности внешнего поля и его энергии, сколько в напряженности поля точечного электрического заряда (кулоновского центра) на расстояниях, не превышающих нескольких межатомных расстояний. Как показано в [18] такой точечный заряд выполняет функцию катализатора химических реакций, при этом активные химические реакции могут протекать в газах, на внешних и внутренних поверхностях минералов.

Диаграммы устойчивости минералов и их ассоциаций, соответствующие Р,Т-параметрам фаций метаморфизма, построенных на данных физических экспериментов, не всегда соответствуют реальным событиям, поскольку значения их завышены, частично идеализированы, что обусловлено условиями, которые не учитывали дополнительное воздействие электрического поля на минеральную систему.

Физико-химические процессы, протекающие в условиях одновременного воздействия нескольких физических полей, будут представлять в этих процессах комплекс конкурирующих между собой химических реакций. Однако преимущественным будет та реакция, которая не будет иметь конкурентов из-за слабого их воздействия. Например, реакция $AB \rightarrow A + B$ без электрического поля идет по пути образования нейтральных частиц. Если же на эту реакцию дополнительно влияет электрическое поле, то наиболее вероятно, что она пойдет по ионному пути: $AB \rightarrow A^+ + B^-$, т.е. по пути образования химически активных частиц.

Преобладающая роль любого из параметров – давления, температуры, состава флюидов, электрического и магнитного полей приводит к образованию существенно различных минеральных фаз в системе, состоящей из одних и тех же химических элементов, а, следовательно, и к различной степени устойчивости пород.

Принцип смещения равновесия при изменении напряженности электрического поля также позволяет предсказать направление протекания процессов в физико-химической системе. Если на равновесную систему воздействовать извне, изменяя величину напряженности электрического поля, то положение равновесия и процессы в системе сместятся в направлении ослабления эффекта действующего поля. В этом случае, по крайней мере, хотя бы одна новообразованная минеральная фаза будет характеризоваться большим по сравнению с любой из исходных фаз значением диэлектрической проницаемости, более высокой электропроводностью.

Поскольку действие электрического поля не только стимулирует образование газа из угля аналогично термической или механохимической активации, но, как показывают результаты исследования, снижают температурный порог, соответствующий интенсивному выделению газов. Это связано с тем, что при дополнительном воздействии электрического поля величина энергетического барьера для химических реакций снижается.

Список литературы

1. Соболев В.В. Методы комплексной обработки давлением и их применение для реализации физико-химических превращений в углеродсодержащих материалах [Текст]: Дис. ... докт. техн. наук: 01.04.17; 05.03.05 / Соболев, Валерий Викторович. – Днепропетровск, 1990. – 473 с.
2. Костылев С. А., Шкут В. А. Электронное переключение в аморфных полупроводниках. – Киев: Наукова думка, 1978. – 203 с.
3. Орлинская О.В. Термоэлектрическая обработка минералов и горных пород / О.В. Орлинская, В.В. Соболев, А.В. Чернай. – Днепропетровск: НГА Украины, 1999. – 93 с.]
4. Соболев В.В. Физико-химический механизм образования графита в горных породах / В.В.Соболев, О.В.Орлинская, А.А.Ващенко // Науковий вісник НГА України. – 2000. – № 4.

– С. 49–50.

5. Соболев В.В. Влияние температуры и электрического поля на электропроводность образцов минералов и горных пород. 1. Яшма / В.В.Соболев, О.В.Орлинская, А.В.Чернай и др. // Минералогический журнал. – 1998. – № 4. – С. 90–95.

6. Соболев В.В. Образование новых фаз в измельченном кальците с добавками кремния при нагревании и пропускании электрического тока // Минералогический журнал. – 2008. – № 4. – С. 25–32.

7. Соболев В.В. Электротермическое стимулирование процесса образования новых минеральных фаз в системе сидерит–кальцит–кремний / В.В.Соболев, Р.Б.Камков // Записки Российского минералогического общества. – 2008. – Ч. 137, № 1. – С. 65–71.

8. Лизун С.А. Определение физических параметров каменных углей в условиях воздействия полей различной физической природы [Текст]: дис. ... канд. геолого-минералогических наук: 04.00.12 / Лизун, Степан Сергеевич. – Львов, 1984. – 235 с.

9. Завилопуло А.Н. Масс-спектроскопическое исследование угольных газов [Текст] / А.Н.Завилопуло, Микита М.И., О.Б. Шпеник // Письма в журнал технической физики. – 2011. – Том 37, вып. 16. – С. 44–51.

10. Завилопуло А.Н. Масс-спектроскопическое исследование угольных газов из образцов низкой и высокой степеней углефикации [Текст] / А.Н.Завилопуло, Микита М.И., О.Б. Шпеник // Письма в журнал технической физики. – 2012. – Том 82, вып. 7. – С. 30–37.

11. Кирда В.С. Влияние тонкого измельчения на строение и свойства углей [Текст] / В.С.Кирда, Т.М.Хренкова, И.Б.Киричко // Химия твердого топлива. – 1983. – № 6. – С. 45–52.

12. Соболев В.В. Образование газа как результат механодеструкции органической массы угля / В.В.Соболев, А.В.Чернай, Н.В.Билан, А.О.Филиппов // Форум гірників – 2009. Матеріали міжнар. конф. "Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання".– Д.: Національний гірничий університет, 2009. – С. 186–191.

13. Пивняк Г.Г. Электрохимическая активация наноструктурных компонентов каменного угля / Г.Г.Пивняк, В.В.Соболев, А.О. Филиппов. – Доп. НАН України. – 2012. – № 1. – С.89–94.

14. Электрические свойства выбросоопасных каменных углей и прогнозирование выброса угля и газа / П.П.Зайцев, Г.В.Малова, Е.М.Панченко и др. // Химия твердого топлива.— 1992.— № 5. – С. 88-92.

15. Миндели Э.О. Электронографическое исследование алмазов, синтезированных в экстремальных условиях / Э.О. Миндели, Э.Ш. Чагелишвили, Т.И. Мечурчлишвили // Физика и техника высоких давлений. – 1980. – № 2. – С. 56–58.

16. Турманидзе Н.С. Исследование влияния предварительного нагрева на превращение графита в алмаз при ударно-волновом нагружении: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.17 / Турманидзе, Нодар Сергеевич. – Черноголовка, 1983. – 18 с.

17. Соболев В.В. Изменение зернового состава кристаллов алмаза при обработке продуктов синтеза в электромагнитном поле / В.В. Соболев, Е.В. Бондаренко // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 4. – С. 57–58.

18. Соболев В.В. Закономерности изменения энергии химической связи в поле точечного заряда / В.В.Соболев // Доп. НАН України. – 2010. – №4. – С. 88–95.